Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 102 (2010)
Heft: 1

Artikel: Modelle zur Abschätzung des Ablagerungsverhaltens von Murgängen
Autor: Rickenmann, Daniel / Scheidl, Christian
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941638

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Modelle zur Abschätzung des Ablagerungsverhaltens von Murgängen

Dieter Rickenmann und Christian Scheidl

1. Einleitung

Seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts werden in den meisten Alpenländern Naturgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten berücksichtigt. Zur Darstellung und Information haben sich Karten mit Angaben zu Art und Grad der Bedrohung alpiner Gefahrenprozesse durchgesetzt. In der Schweiz und auch in anderen Ländern sind für die Abgrenzung der Gefahrenbereiche von Murgängen im Wesentlichen die folgenden drei Parameter massgebend: betroffene Fläche, Intensität des Prozesses (z.B. Fliessgeschwindigkeit, Ablagerungshöhe) und Auftretenshäufigkeit.

Für die Bestimmung des raumrelevanten Bereiches müssen z.B. in der Schweiz für Murgänge die Intensitäten und maximale Reichweite sowie die seitliche Ausbreitung abgeschätzt werden (BWW/BRP/BUWAL, 1997). Dies kann mit der Anwendung von Simulationsmodellen für Murgänge erfolgen. Solche Simulationsmodelle sind in erster Linie deterministischer Natur, deren Ziel es ist, alle Parameter und Gesetze des Systems Murgang zu erkennen und dadurch Ereignisse nachzubilden und im Idealfall das Ablagerungsverhalten zu prognostizieren. Die meisten Simulationsmodelle zur Bestimmung der Reichweite oder Vorhersage des Ablagerungsverhaltens von Murgängen beruhen entweder auf empirisch-statistischen Ansätzen oder sind physikalisch basiert (Rickenmann, 1999; Rickenmann et al., 2006; Hürlimann et al., 2008). In *Tabelle 1* sind die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Ansätze zur Gefahrenabgrenzung von Murgängen dargestellt.

Aufgrund der Vor- und Nachteile der beiden Ansätze werden, neben einer geomorphologischen Interpretation von Spuren im Gelände und auf Luftbildern, oft beide in der Praxis kombiniert. In Anbetracht der relativ geringen Häufigkeit an Murgangereignissen – verglichen beispielsweise mit Lawinenereignissen – existiert eine Vielzahl an Ansätzen zur Beschreibung und Vorhersage. In diesem Beitrag werden sowohl empirische Modelle als auch ein einfacher physikalisch-analytischer Ansatz zur Abschätzung des Ablagerungsverhaltens von Murgängen vorgestellt. *Tabelle 2* gibt einen Überblick über die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Modelle.

Empirisch/statistische Ansätze	Physikalisch basierte Ansätze
Quantitative Kriterien zur Gefahrenabgrenzung sind nur teilweise darstellbar (z.B. lineare Reichweite, Fliessgeschwindigkeit, Abflusstiefe).	Quantitative Kriterien zur Gefahrenabgrenzung sind darstellbar.
Für eine Anwendung sind oft wenige und leicht zu erhebende Eingangsparameter notwendig.	Für eine Anwendung müssen oft mehrere und z.T. schwierig zu bestimmende Eingangsparameter bekannt sein.
Die Darstellung von Szenarien ist eingeschränkt möglich.	Die Darstellung von Szenarien ist uneingeschränkt möglich.
Ansätze sind nur für ähnliche naturräumliche Bedingungen gültig, wie sie den Daten zur Herleitung des Ansatzes zu Grunde liegen.	Ansätze sind im Prinzip überall gültig.
Die Eingangsparameter sind leicht zu erheben.	Die Eingangsparameter sind meistens nicht bekannt oder schwierig zu bestimmen.
Ansätze besitzen eine einfache Modellstruktur.	Ansätze besitzen eine komplexe Modellstruktur.
Einfache Anwendungen erleichtern die Interpretation der Ergebnisse.	Die Interpretation der Ergebnisse muss oft durch Experten erfolgen.
Zur Herleitung müssen möglichst viele Daten vorhanden sein.	Ansätze basieren z.B. auf Massenerhaltung, Impulserhaltung und Energieerhaltung.

Tabelle 1. Vor- und Nachteile verschiedener Ansätze zur Abschätzung von Murgang-Ablagerungen.

	Empirisch/statistische Modelle	Physikalische Modelle
1-dimensional	Bestimmung der **Reichweite** aufgrund morphometrischer Grössen. *Corominas (1996)* *Rickenmann (1999)*	Bestimmung der **Auslauflänge** aufgrund eines Modelles mit konstantem Abfluss. *Takahashi und Yoshida(1979)* *Hungr et al. (1984)* *Takahashi (1991)*
2-dimensional	Bestimmung der **Ablagerungsfläche** mittels des Volumen-Flächen Modelles „TopRunDF" *Scheidl und Rickenmann (2009)*	

Tabelle 2. Übersicht über die in dieser Studie vorgestellten Modelle.

2. Datengrundlage und Klassifizierung

Für diese Untersuchung wurden Daten von Murgangereignissen in Österreich, der Schweiz und in Italien (Südtirol) verwendet. Dabei handelt es sich um historische Ereignisse, die auf Informationen in vorhandenen Dokumenten basieren. Dabei sind im besten Fall umfangreiche Ereignisdokumentationen mit zusätzlichem räumlichem Informationsmaterial, wie digitale Geländemodelle (DGM), Luftbilder, Fotos oder Situationskarten vorhanden. Von anderen Ereignissen sind manchmal nur die wichtigsten Kenngrössen bekannt. Von jedem Ereignis wurden topographische und morphometrische Parameter erhoben, im Minimum das Ablagerungsvolumen, die Fläche der Ablagerung, die Kegel- und Gerinneneigung sowie Kenngrössen des Einzugsgebietes. Ablagerungsflächen wurden aus Luftbildern oder, falls nicht vor-

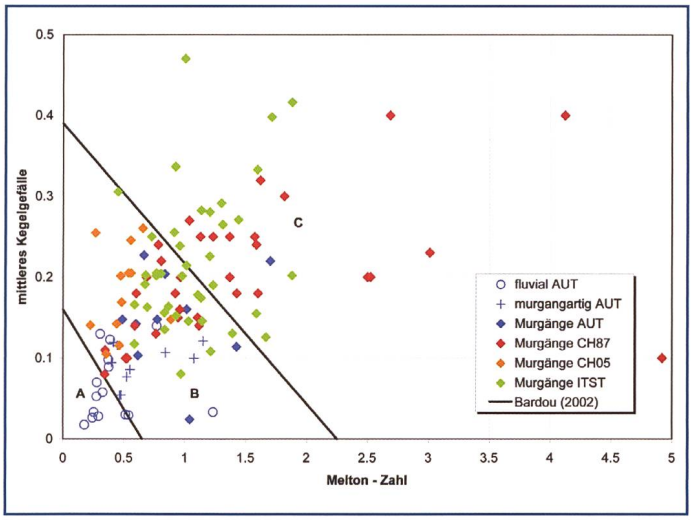

Bild 1. Kegelneigung vs. Melton-Zahl (Gl. 1) mit Grenzlinien nach Bardou (2002). Zone A zeigt den Bereich des fluvialen Feststofftransportes, Zone C den Bereich für Murgänge und Zone B den Übergangsbereich für murgangartige Ereignisse.

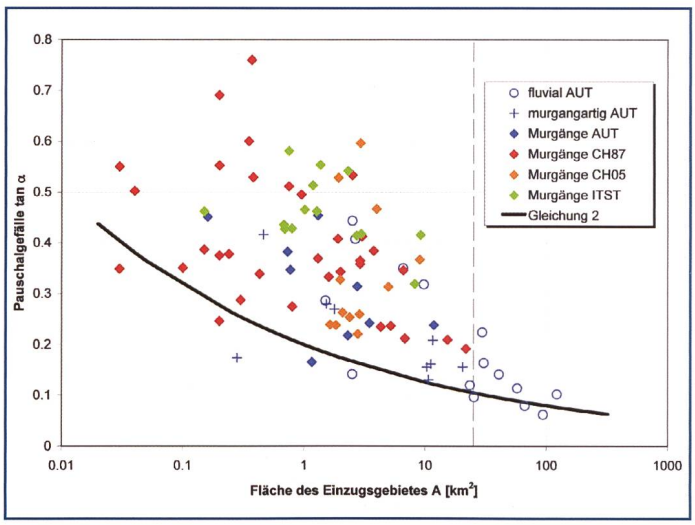

Bild 2. Pauschalgefälle vs. Einzugsgebietsgrösse mit der Grenzlinie nach Zimmermann et al. (1997), Gl. (2). Die gestrichelte Linie bezieht sich auf eine kritische Grösse des Einzugsgebietes von 25 km².

handen, aus Situationskarten abgeleitet. Die Volumen der Ablagerungen wurden den vorhandenen Ereignisdokumentationen entnommen. Für einige Schweizer Ereignisse der Unwetter 2005 wurde die Methode der lasergestützten Fernerkundung (LiDAR-Analyse) zur Bestimmung des abgelagerten Volumens verwendet (Scheidl et al., 2008). Insgesamt besteht die Datenbank der erhobenen Ereignisse aus 106 Murgängen, 10 murgangartigen Ereignissen sowie 10 Ereignissen mit fluvialem Feststofftransport. Die Unterscheidung der Prozesstypen basiert in erster Linie auf den Ereignisdokumentationen bzw. den üblichen Unterscheidungskriterien für Wildbachprozesse (Costa, 1988; Hübl et al., 2002; ONR-24800, 2009).

Die Datensätze der Murereignisse dieser Studie wurden nach den zugrundeliegenden Ereignisdokumentationen gruppiert:

- Murgänge AUT: Ereignisse aus Österreich, basierend auf der Dokumentation von Schraml (2008).
- Murgänge CH87: Ereignisse aus der Schweiz, basierend auf der Ereignisdokumentation des Hochwasserereignisses 1987 (VAW, 1987).
- Murgänge CH05: Ereignisse aus der Schweiz, basierend auf der Ereignisdokumentation des Hochwasserereignisses 2005 (Bezzola & Hegg, 2007, Rickenmann et al., 2008).
- Murgänge ITST: Ereignisse aus Südtirol, basierend auf der Ereignisdokumentation (ED30) der Abteilung 30,– Schutzwasserbauten der Provinz Bozen (Hochschwarzer, 2009).
- Die Daten der murgangartigen sowie fluvialen Feststoffereignisse (murgangartig AUT; fluvial AUT) stammen alle aus der Dokumentation von Schraml (2008).

Für eine Überprüfung der Prozessklassifikation wurde eine von Bardou (2002) vorgestellte Methode angewandt. Dabei sind die Reliefenergie des Einzugsgebietes und die Neigung des Schwemmkegels Indizien für die vorherrschende Prozessart *(Bild 1)*. Die Reliefenergie eines Einzugsgebietes lässt sich mit der dimensionslosen Melton-Zahl beschreiben (Melton, 1965):

$$M_E = \frac{Elev._{\max} - Elev._{\min}}{\sqrt{A}} \qquad (1)$$

Eingangsgrössen sind die Höhendifferenz zwischen dem höchsten und niedrigsten Punkt im Einzugsgebiet ($Elev_{max}$ bzw. $Elev_{min}$) sowie die Fläche des Einzugsgebietes (A), wobei als untere Begrenzung des Einzugsgebietes der Beginn der Ablagerung angenommen wird (Kegelhals). In *Bild 1* zeigt die Zone A den Bereich des fluvialen Feststofftransportes und Zone C den Bereich für Murgänge an; dazwischen liegt der Übergangsbereich für murgangartige Ereignisse, Zone B.

Weitere Methoden zur Klassifizierung von Prozesstypen basieren auf der Einzugsgebietsgrösse und mittleren Gerinneneigung. Marchi und D'Agostini (2004) analysierten 127 Murgangereignisse in den italienischen Alpen, von denen 125 Ereignisse Einzugsgebiete kleiner als 20 km² und mittlere Gerinneneigungen grösser als 10% aufweisen. Für die Dokumentation der Hochwasserereignisse 2005 in der Schweiz unterschieden Rickenmann et al. (2008) Wildbäche und flachere Gebirgsflüsse mit einem Grenzwert für die Einzugsgebietsgrösse von 25 km² und für die mittlere Gerinneneigung von ca. 5–10%. Murgangereignisse traten nur in Einzugsgebieten kleiner als 25 km² auf. *Bild 2* zeigt das Pauschalgefälle und die Fläche des Einzugsgebietes für unsere Daten. Es ist deutlich, dass ab einem Einzugsgebiet grösser 25 km² keine Murgangereignisse vertreten sind. Im Weiteren ist erkennbar, dass die Daten mit dem empirisch basierten Ansatz zur Bestimmung des minimalen Pauschalgefälles (tan α_{min}) nach Zimmermann et al. (1997) gut übereinstimmen:

$$\tan \alpha_{\min} = 0.2 A^{-0.2} \qquad (2)$$

Die Mehrzahl der als fluvialer Sedimenttransport eingestuften Ereignisse unserer Daten bestätigen die oben angeführten Klassifizierungsansätze. Sie befinden sich in Zone A *(Bild 1)* und weisen Einzugsgebiete grösser 25 km² auf *(Bild 2)*. In dieser Studie wurden für die Anwendung der vorgestellten Simulationsmodelle nur Murgänge und murgangartige Ereignisse miteinbezogen.

3. Modelle zur Bestimmung der Ablagerung von Murgängen

Die Modelle in *Tabelle 2* basieren entweder auf beobachteten Murgangereignissen (empirische Ansätze) oder beziehen sich auf allgemein gültige physikalische Beschreibungen des Prozesses (physikalische Ansätze). Das Ausmass der Ablagerung wird entweder eindimensional über die Reichweite bzw. die Auslauflänge oder zweidimensional anhand der Ablagerungsfläche bestimmt. Die Reichweite L_R eines Murganges bezeichnet hier die

horizontale Distanz vom höchsten Punkt der Anrisszone bis zum tiefsten Punkt der Ablagerung, im Situationsplan entlang des Fliessweges gemessen. Als Auslauflänge L_A eines Murganges wird hier die horizontale Länge der Ablagerung auf dem Kegel bezeichnet. Es ist die Länge vom Prozessbeginn bis zum tiefstgelegenen (entferntesten) Punkt der Ablagerung.

3.1 Ansätze für die Reichweite

Beobachtungen von Bergstürzen und Murgangereignissen zeigen, dass ein Zusammenhang zwischen der Grösse des abgelagerten Volumens und der Reichweite eines Ereignisses besteht. Man stellte fest, dass die Mobilität eines Ereignisses mit ihrem Volumen zunimmt, d.h., dass der Widerstand der bewegten Masse (die Reibung) mit zunehmenden Volumen abnimmt. Nach Heim (1932) ist dieser pauschale Widerstand als dimensionsloser Reibungswinkel – dem Pauschalgefälle – darstellbar.

$$\tan\alpha = \frac{H}{L_R} \tag{3}$$

In Gl. (3) bezeichnet H die gesamte Höhendifferenz (vertikal) und L_R die Reichweite (horizontal) vom höchsten Punkt der Anrisszone bis zum tiefsten Punkt der Ablagerung. Corominas (1996) fand anhand von 71 Murgangereignissen einen Zusammenhang zwischen tan α und dem Murgangvolumen V, welcher sich wie folgt darstellen lässt:

$$L_{R\ Corominas} = 1.03\, V^{0.105} H \tag{4}$$

Basierend auf mehr als 150 Murgangereignissen vor allem aus der Schweiz entwickelte Rickenmann (1999) eine ähnliche Beziehung zur Berechnung der Reichweite:

$$L_{R\ Rickenmann} = 1.9\, V^{0.16} H^{0.83} \tag{5}$$

Bild 3 zeigt einen Vergleich zwischen beobachteten Reichweiten und berechneten Reichweiten nach Gl. (5) für Murgänge sowie murgangartige Ereignisse dieser Studie.

Bis zu einer Reichweite von 4000 m treten für Murgänge keine systematischen Abweichungen auf, hingegen unterschätzt der Ansatz nach Gl. (5) die murgangartigen Feststofftransporte systematisch. Betrachtet man nur Murgänge, beträgt der Mittelwert des Verhältnisses von $L_{R_Rickenmann}$ zu $L_{R_beobachtet}$ 1.00, mit einem Variationskoeffizienten von 0.31 (entspricht hier der Standardabweichung). Zu beachten ist, dass 34 (der hier insgesamt 94 verwendeten) Murgangereignisse auch für die Entwicklung von Gl. (5) verwendet wurden. Unter Verwendung von Gl. (4) beträgt der Mittelwert des Verhältnisses $L_{R_Corominas}/L_{R_beobachtet}$ 0.96 mit einem Variationskoeffizienten von 0.31, ebenfalls nur für die Murgangereignisse betrachtet. Die Prognosequalität der zwei Gleichungen ist somit ähnlich, und die Unsicherheit der Schätzung beträgt bei beiden Gleichungen ungefähr +/– 30% der beobachteten Reichweite. Ist man vor allem an der Auslauflänge auf dem Kegel interessiert, kann die Unsicherheit also beträchtlich sein.

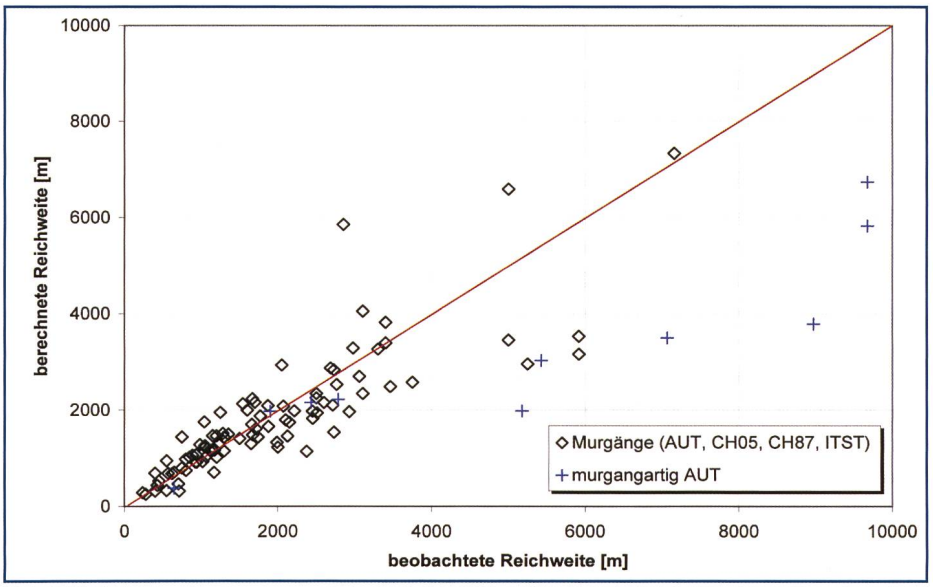

Bild 3. Vergleich der berechneten horizontalen Reichweiten nach Gl. (5) mit den beobachteten Reichweiten der Murgangereignisse bzw. murgangartigen Ereignisse; die rote Linie entspricht der 1:1-Beziehung zwischen berechneter und beobachteter Reichweite.

Datensatz bzw. Studie	Prozesstyp	Region	Anzahl der Ereignisse	k_B
Crosta et al. (2003)	Granulare Murgänge	Alpen, Norditalien	91	6.2
Murgänge ITST	Granulare Murgänge	Alpen, Südtirol	44	17.3
Griswold (2004)	Murgänge	Weltweit	44	19.9
Murgänge CH87	Granulare Murgänge	Alpen, Schweiz	34	28.1
Yu et al. (2006)	Murgänge	Xueshan, Taiwan	6	28.8
Murgänge CH05	Murgänge	Alpen, Schweiz	8	32
Berti and Simoni (2007)	Murgänge	Alpen, Norditalien	24	33
Murgänge AUT	Murgänge	Alpen, Österreich	27	44.7
Capra et al. (2002)	Erdrutschungen und Murgänge	Transmexikanischer Vulkangürtel	6	55
murgangartig AUT + fluvial AUT	Murgangartiger und fluvialer Feststofftransport	Alpen, Österreich	27	56
Waythomas et al. (2000)	Vulkanische Erdströme	Alaska	10	91.8
Iverson et al. (1998)	Lahars	USA, Kolumbien, Philippinen	27	200

Tabelle 3. Vergleich der charakteristischen Mobilitätskoeffizienten kB (Scheidl & Rickenmann, 2009).

3.2 Ablagerungsfläche und Mobilitätskoeffizient

Daten von beobachteten Ablagerungsflächen und deren mittleren Ablagerungshöhen führen zu einer einfachen geometrischen Ähnlichkeitsbeziehung. Nimmt man das Verhältnis von mittlerer beobachteter Ablagerungshöhe $\bar{h}$ zur Wurzel der Ablagerungsfläche B als konstant an, kann man die zu erwartende Ablagerungsfläche B bei bekanntem Ablagerungsvolumen V bestimmen (Iverson et al., 1998):

$$B = k_B\, V^{2/3} \tag{6}$$

Der Wert k_B in Gl. (6) ist dimensionslos und daher für Untergruppen von Murgängen mit unterschiedlicher Mobilität einfach vergleichbar. Wird k_B für eine Anzahl beobachteter Ereignisse mit ähnlichen Materialeigenschaften bestimmt, d.h. für eine Untergruppe von Murgängen mit vergleichbarer Mobilität, so kann anhand einer Regression für eine Potenzfunktion gemäss Gl. (6) ein charakteristischer k_B Wert bestimmt werden. Diese Werte sind in *Tabelle 3* für verschiedene Untergruppen von Murgän-

gen oder murgangähnlichen Ereignissen, basierend auf den eigenen Daten sowie auf Daten anderer Studien, zusammengestellt (Scheidl & Rickenmann, 2009).

Die k_B-Werte in *Tabelle 3* liegen zwischen 6 und 200, je nach Prozesstyp beginnend bei granularen (grobkörnigen) Murgängen (kleine k_B-Werte) bis Lahars (grosse k_B Werte). Crosta et al. (2003) vermuten, dass granulare Murgänge weniger Wasser enthalten als Lahars und daher relativ kürzere und mächtigere Ablagerungen bilden, was kleinere k_B-Werte impliziert. Eine Bestätigung dieser Annahme liefern die Daten für murgangartigen bzw. fluvialen Feststofftransport. Der k_B-Wert dieser Datengruppe liegt zwischen den k_B-Werten der Murgänge und jenen von vulkanischen Erdströmen und Lahars. Dies erscheint sinnvoll, denn murgangartige bzw. fluviale Feststofftransport-Ereignisse haben typischerweise einen höheren Wassergehalt als Murgänge und transportieren andererseits grössere Sedimentkörner als Lahars.

Wird k_B aus dem beobachteten Volumen sowie der Ablagerungsfläche für das Einzelereignis abgeleitet, wird er hier als beobachteter Mobilitätskoeffizient k_B' bezeichnet:

$$k_B' = B_{beobachtet} V_{beobachtet}^{-2/3} \quad (7)$$

Für eine Prognose der Ablagerungsfläche ist es hilfreich, wenn der Mobilitätskoeffizient unabhängig von einer (teilweise subjektiven) a priori Zuordnung eines Wildbaches oder Ereignisses zu einer bestimmten Untergruppe von Murgangtypen bestimmt werden kann. Scheidl & Rickenmann (2009) fanden einen Zusammenhang zwischen den beobachteten Mobilitätskoeffizienten k_B' und der Gerinneneigung S_G bzw. Kegelneigung S_K. Der prognostizierte Mobilitätskoeffizient k_{Bprog} berücksichtigt zusätzlich noch eine Korrektur zur Verringerung einer systematischen Abweichung in Abhängigkeit der Mobilität und lässt sich wie folgt berechnen (Scheidl & Rickenmann, 2009):

$$k_{Bprog} = 5.07 S_K^{-0.10} S_G^{-1.68} \quad (8)$$

Die normierten, prognostizierten Mobilitätskoeffizienten k_{Bprog}^* werden definiert als:

$$k_{Bprog}^* = k_{Bprog} \overline{\left(\frac{k_B'}{k_{Bprog}} \right)} \quad (9)$$

In *Bild 4* ist k_{Bprog}^*/k_B' in Abhängigkeit der beobachteten Mobilitätskoeffizienten k_B' dargestellt. Das Verhältnis k_{Bprog}^*/k_B' hat eine Standardabweichung von ± 0.71 um den Mittelwert von 1.0. Da *kB* linear in der Gl. (6) auftritt, beträgt die Unsicherheit der Schätzung ungefähr +/- 70% der beobachteten Ablagerungsfläche.

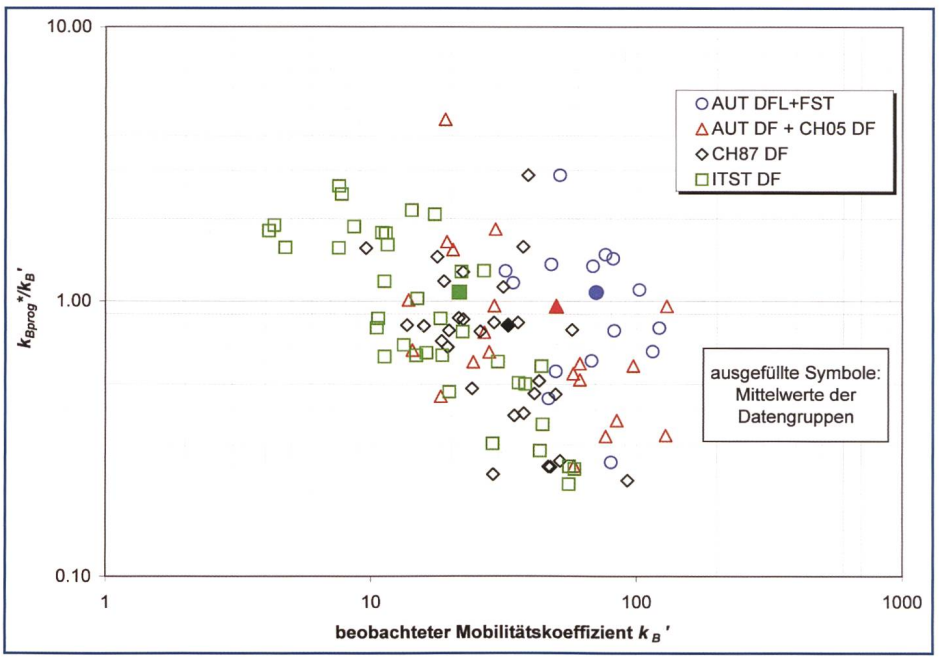

Bild 4. Normierte, prognostizierte Mobilitätskoeffizienten sind als k_{Bprog}^*/k_B' in Abhängigkeit der beobachteten k_B'-Werte dargestellt. Es zeigt sich ein leichter Trend zur systematischen Unterschätzung der Ablagerungsfläche für Murgangereignisse mit grösserer Mobilität. Die ausgefüllten Symbole zeigen die Mittelwerte von k_{Bprog}^*/k_B' und k_B' der jeweiligen Datengruppen.

Datengruppen	Anzahl	$\overline{\left(\frac{k_{Bprog}}{k_B'}\right)}$	Stabw.	$\overline{\left(\frac{k_{Bprog}^*}{k_B'}\right)}$	Stabw.*
AUT DFL + FST	15	1.37	0.81	1.08	0.64
AUT DF + CH05 DF	20	1.22	1.23	0.96	1.28
CH87 DF	29	1.05	0.71	0.82	0.56
ITST DF	36	1.38	0.88	1.08	0.69

Tabelle 4. Vergleich der Mittelwerte der Verhältnisse k_{Bprog}/k_B' und k_{Bprog}^*/k_B' für alle Datengruppen. Stabw. bezeichnet die Standardabweichung der Verhältniswerte der Spalte davor.

Tabelle 4 vergleicht die Mittelwerte der Verhältnisse k_{Bprog} (Gl. 8) zu k_B' mit den Mittelwerten der Verhältnisse k_{Bprog}^* (Gl. 9) zu k_B' für alle Datengruppen. *Tabelle 4* und *Bild 4* zeigen, dass im Durchschnitt die mit Gl. (9) prognostizierten Mobilitätskoeffizienten für alle Murgänge ausser den Südtiroler Ereignissen unterschätzt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Gl. (8) nicht nur auf Murgangereignissen, sondern auch auf fluvialen und murartigen Ereignissen beruht. Aus *Tabelle 4* ist weiter ersichtlich, dass im Durchschnitt die mit Gl. (8) prognostizierten Mobilitätskoeffizienten überschätzt werden. Für die Bestimmung der Ablagerungsflächen in der Praxis wird deshalb die Verwendung von k_{Bprog} nach Gl. (8) empfohlen.

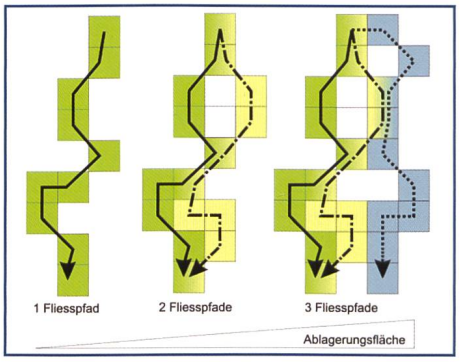

Bild 5. Modellierung der potenziellen Ablagerungsfläche aufgrund multipler Fliesspfade (nach Scheidl & Rickenmann, 2009).

3.3 Das Simulationsmodell TopRunDF

TopRunDF ist ein Programm zur Simulation der Ablagerungsfläche und Ablagerungshöhe für Murgänge (Scheidl & Rickenmann, 2009). Eingangsparameter sind das Volumen, ein Mobilitätskoeffizient (Gl. 8), der Startpunkt der Ablagerung sowie ein digitales Geländemodell des Ablagerungsbe-

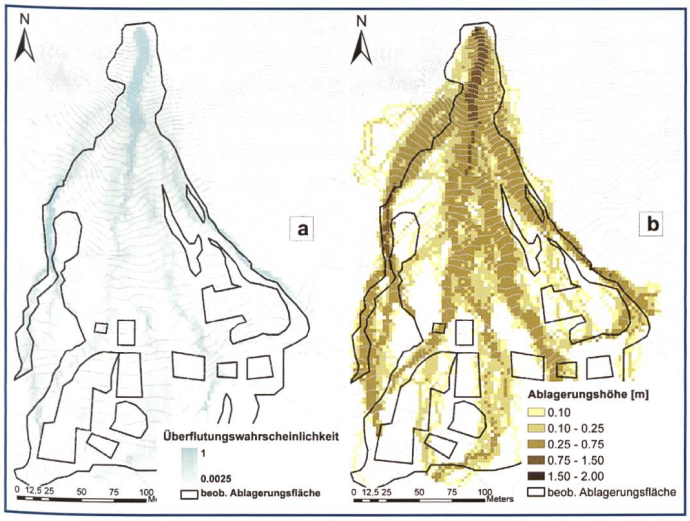

Bild 6. TopRunDF-Simulation für den Glattbach: a) Simulierte Überflutungswahrscheinlichkeiten; b) Simulierte Ablagerungshöhe. Beide Simulationen wurden mit k_B', d.h. mit der effektiv beobachteten Ablagerungsfläche durchgeführt.

Ereignis	Datensatz	$V_{dok.}$	k_B'	$k_{B\,prog}$
Rotlauibach	CH05	399'000	14	12
Glattbach	CH05	8'762	76	32
Schwendibach	CH05	11'000	58	19
Blauseeligraben	CH87	2'000	35	17
Gonerli	CH87	5'000	32	45
Piz Caral	CH87	3'000	29	9
Richleren	CH87	9'000	92	26
Heugandtal	CH87	7'000	48	15
Brichboden	CH87	4'000	52	17
Saasbach	CH87	180'000	19	28
ValMera 1	CH87	2'000	29	32
Gerental 3B	CH87	33'000	19	17
Ri Di Gallinoso	CH87	4'000	57	59
Ri Di Sozz	CH87	3'000	38	19

Tabelle 5. Übersicht der simulierten Murgangereignisse (nach Scheidl & Rickenmann, 2009).

reiches (Murkegel). Das Programm benützt die Flächen-Volumen Beziehung (Gl. 6 und Gl. 8) und einen D8-Algorithmus zur Bestimmung der Fliesspfade kombiniert mit einer Monte-Carlo-Technik, welcher eine potenzielle Ausbreitung der Ablagerung in Abhängigkeit der Kegeltopographie simuliert (Hürlimann et al., 2008). Durch wiederkehrende Simulationen von Fliesspfaden kommt es zu einer seitlichen Ausbreitung der simulierten Ablagerungsfläche *(Bild 5)*. Die Modellierung der Fliesspfade folgt dabei nicht immer dem steilsten Gefälle, sondern beruht auf einem Zufallsprinzip (Monte-Carlo-Technik).

Sobald die simulierte Ablagerungsfläche die berechnete Fläche aus Gl. (6) überschreitet, wird die Schleife der Simulation der Fliesspfade beendet. Für jede Zelle der endgültigen simulierten Ablagerungsfläche wird anschliessend dessen Überflutungswahrscheinlichkeit bestimmt. Das vorgegebene Volumen wird dann gemäss der Überflutungswahrscheinlichkeit jeder Zelle in entsprechende Ablagerungsmächtigkeiten aufgeteilt. Als Beispiel zeigt *Bild 6* für den Glattbach die Überflutungswahrscheinlichkeiten und die simulierten Ablagerungshöhen für jede Zelle der simulierten Ablagerungsfläche.

Bild 7 zeigt insgesamt 14 mit TopRunDF simulierte Murgangereignisse aus der Schweiz unter Verwendung der effektiv beobachteten Ablagerungsfläche

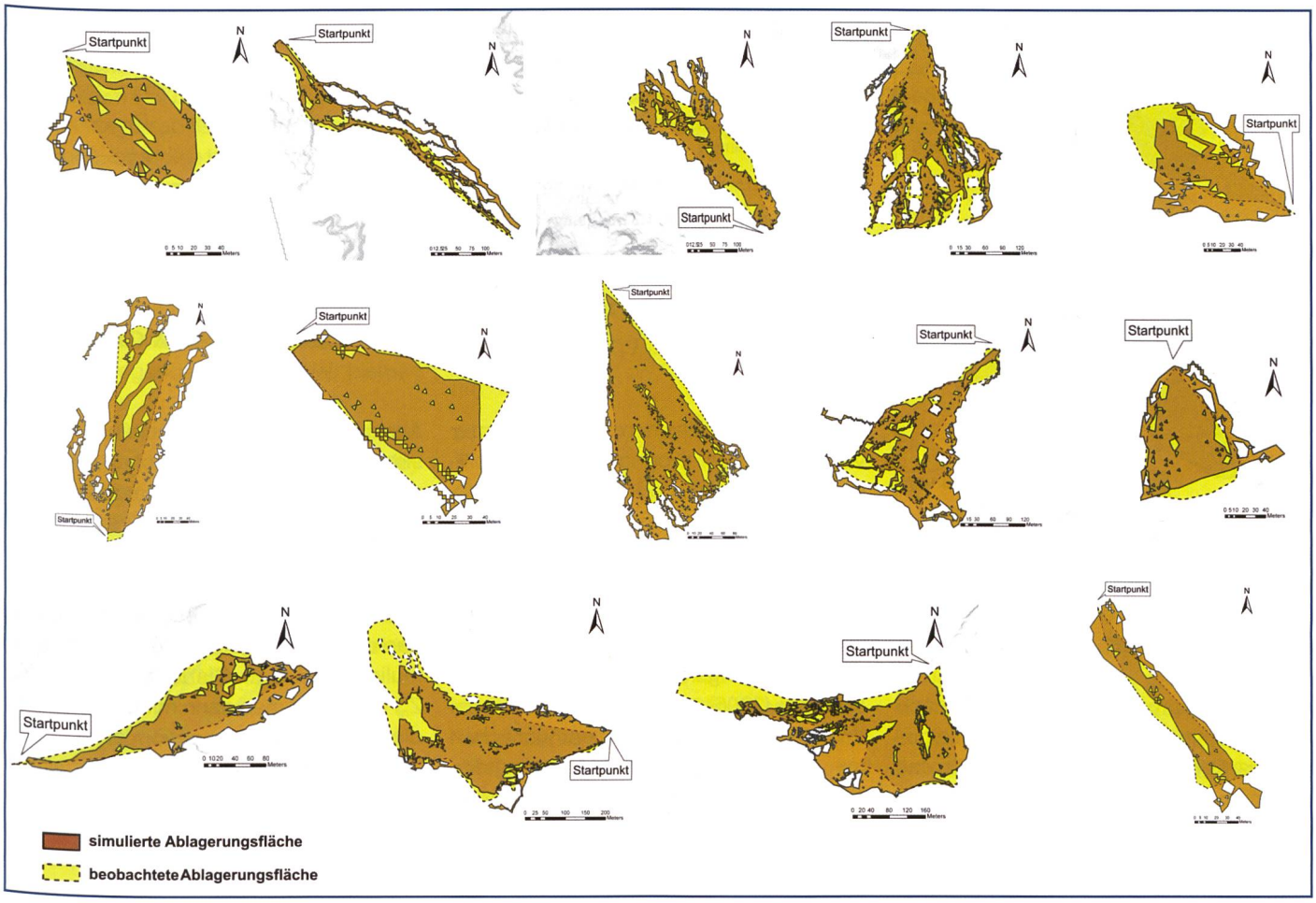

Bild 7. TopRunDF-Simulation für 14 Murgangereignisse aus der Schweiz unter Verwendung der effektiv beobachteten Ablagerungsfläche (d.h. mit k_B' nach Gl. 7).

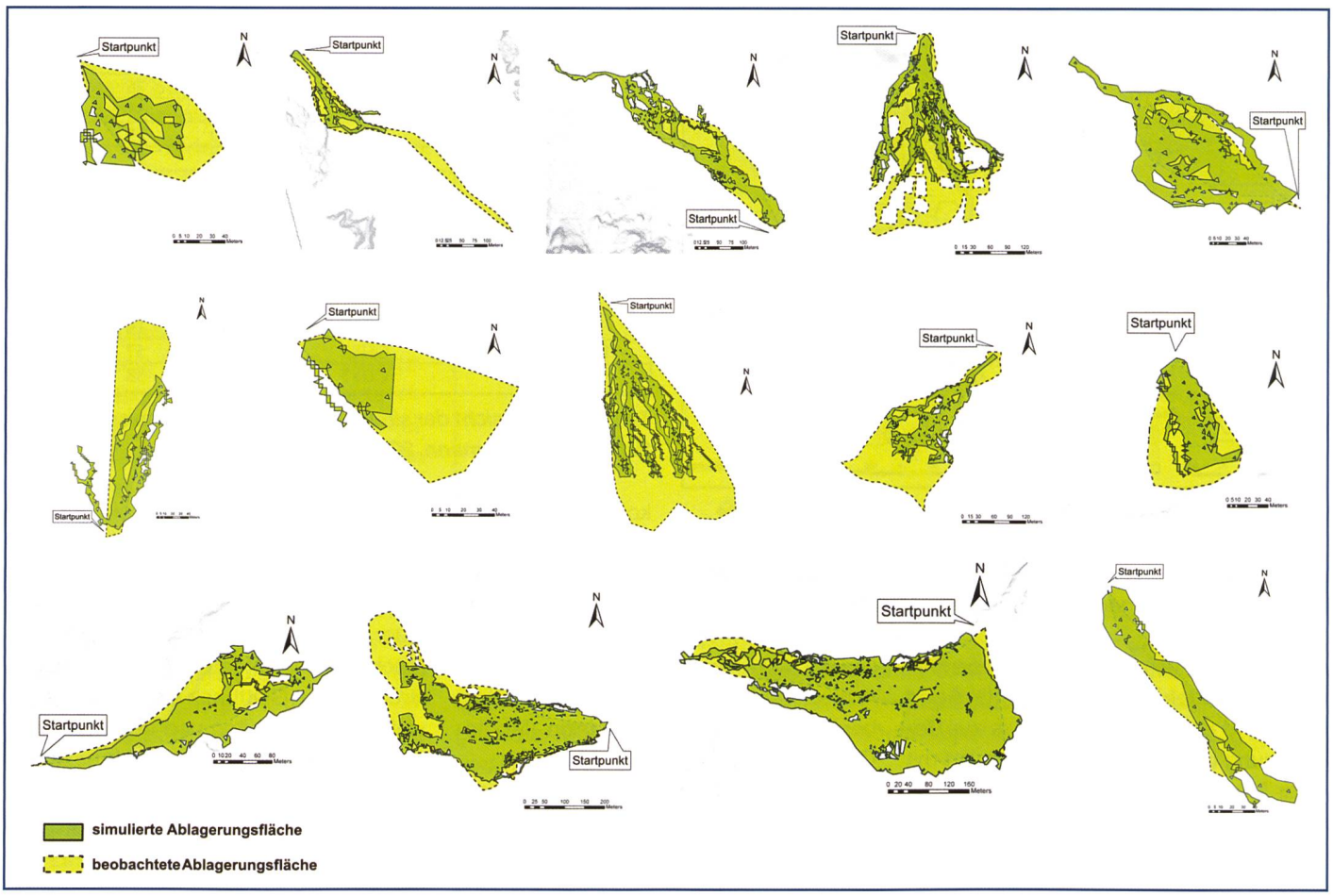

Bild 8. TopRunDF-Simulation für 14 Murgangereignisse aus der Schweiz unter Verwendung von k_{Bprog} nach Gl. (8).

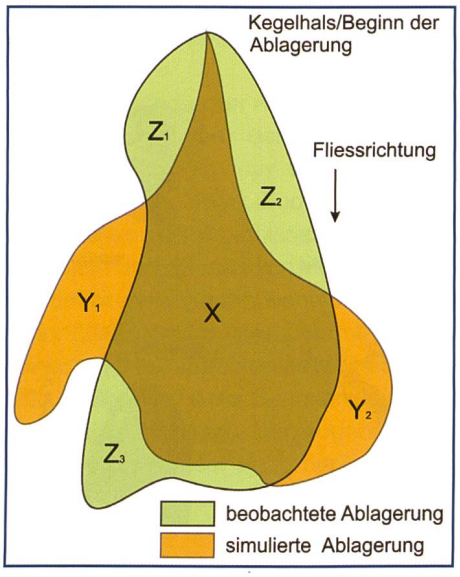

Bild 9. Bewertung der Vorhersage von Ablagerungsflächen: Bestimmung von Teilflächen nach einer Methode von Carranza & Castro (2006).

	Simulierte Ablagerungsflächen		Nicht-Simulierte Ablagerungsflächen	
	Fläche	Volumen	Fläche	Volumen
Beobachtete Fläche mit Ablagerungen	positive Überdeckung (X) $\alpha = \frac{B_X}{B_{beobachtet}}$	positive Überdeckung (X) $\varepsilon = \frac{V_X}{V_{beobachtet}}$	keine Überdeckung (Z) $\gamma = \frac{B_Z}{B_{beobachtet}}$	Keine Überdeckung (Z) $\phi = \frac{V_Z}{V_{beobachtet}} = 1 - \varepsilon$
Fläche ohne Ablagerungen	negative Überdeckung (Y) $\beta = \frac{B_Y}{B_{beobachtet}}$	negative Überdeckung (Y) $\phi = \frac{V_Y}{V_{beobachtet}} = 1 - \varepsilon$	-	-

Tabelle 6. Matrix zur Beurteilung der Simulationsergebnisse mit, nach einer Methode von Carranza & Castro (2006).

$$B_\lambda \; bzw. V_\lambda = \sum_{i=1}^{n_\lambda} \lambda_i, \quad \lambda[X, Y, Z],$$

als Eingangsgrösse (entspricht k_B' nach Gl. 7), womit die Qualität des Fliessalgorithmus überprüft werden kann. Für das Ereignis Rotlauibach ist anzumerken, dass beim verwendeten Geländemodell die Höhendaten im unteren Bereich des Kegels nicht repräsentativ sind; dadurch ist die simulierte Ablagerungsfläche kleiner als die beobachtete. In *Bild 8* sind Simulationen der gleichen Ereignisse unter Verwendung der prognostizierten Mobilitätskoeffizienten k_{Bprog} (Gl. 8) dargestellt. Eine Übersicht der simulierten Murgangereignisse und deren Eingangsparameter zeigt *Tabelle 5*.

Für einen Vergleich der simulierten mit den beobachteten Ablagerungen wurde eine Bewertungsmethode nach Carranza & Castro (2006) angewendet. Dabei werden die simulierten Ablagerungsflächen mit den beobachteten Ablagerungsflächen ($B_{beobachtet}$) und mit den beobachteten Volumina ($V_{beobachtet}$) verschnitten *(Bild 9)*. Simulierte Bereiche die sich mit Flächen beobachteter Ablagerungen überschneiden, werden als Teilflächen X_n mit einer positiven Überdeckung bezeichnet (n = Anzahl der Teilflächen). Liegen hingegen simulierte Flächen in Bereichen ohne beobachtete Ablagerungen, so werden diese als Teilflächen Y_n mit negativer Überdeckung benannt. Keine Überdeckung bezeichnen Teilflächen Z_n. Diese Bereiche weisen beobachtete Ablagerungen auf, überdecken sich jedoch nicht mit den simulierten Flächen. Die Teilflächen (X_n, Y_n, Z_n) vergleicht man dann mit $B_{beobachtet}$ und die zu den Teilflächen gehörigen Volumen vergleicht man mit $V_{beobachtet}$. *Tabelle 6* zeigt eine Matrix zur Beurteilung der Simulationsergebnisse. Die Werte α, β, ε, ϕ, und γ bezeichnen die prozentuellen Anteile der positiven, negativen oder fehlenden Überdeckung der jeweiligen summierten Teilflächen (B_X, B_Y, B_Z) bzw. Teilvolumina

(V_X, V_Y, V_Z) mit $B_{beobachtet}$ bzw. $V_{beobachtet}$. Aus den in *Tabelle 6* angeführten prozentuellen Anteilen lässt sich ein Bewertungsfaktor Ω berechnen, der die Deckungsgenauigkeit der simulierten Ergebnisse mit den beobachteten Flächen und beobachteten Volumina kombiniert:

$$\Omega = \alpha - \beta - \gamma + \varepsilon \qquad (10)$$

Die bestmögliche Simulation entspricht einem Bewertungsfaktor von $\Omega = 2$, wenn die simulierten Bereiche exakt mit den beobachteten Bereichen übereinstimmen. Im Gegensatz dazu wird Ω = -2, wenn keine Überdeckung zwischen simulierten und beobachteten Bereichen besteht. Für die Simulationsresultate mit TopRunDF unter Verwendung der beobachteten Ablagerungsfläche (d.h. mit den Mobilitätskoeffizienten k_B' gerechnet; *Bild 7*) sind in *Tabelle 7* die Bewertungsfaktoren aufgeführt. *Tabelle 8* zeigt die Bewertungsfaktoren für die Simulationsresultate mit TopRunDF unter Verwendung des prognostizierten Mobilitätskoeffizienten k_{Bprog} *(Bild 8)*.

Bei einem stark eingetieften Gerinne auf dem Kegel besteht die Möglichkeit, dass es zu keiner lateralen Ausbreitung der simulierten Ablagerungsfläche kommt und dass die angenommene Ablagerungsfläche (Gl. 6) nie erreicht wird. In solch einem Fall bricht das Programm die Berechnungen ab. Um dieses Problem zu umgehen, kann eine temporäre, künstliche Geländeerhöhung für das gesamte Geländemodell definiert werden. Diese Geländeerhöhung betrifft immer nur die jeweilige Ausgangszelle und erhöht temporär das Gefälle dieser Zelle. Sowohl die an sie angrenzenden Nachbarzellen als auch das zugrunde liegende Höhenmodell bleiben unbetroffen.

TopRunDF ist in VB 6.0© als freie Software, unter der «New BSD (Berkeley Software Distribution) Lizenz» entwickelt. Es ist für LiDAR Daten mit einer Auflösung von 2.5 m optimiert.

Das Programm, der Source-Code sowie eine Benutzungsanleitung kann unter: www.debris-flow.at nach Registrierung heruntergeladen werden.

Ereignis	α	β	γ	ε	ϕ	Ω	$\overline{h}_{obs}$ [m]
Piz Caral	0.79	0.08	0.21	0.94	0.06	1.44	0.5
Richleren	0.79	0.17	0.21	0.90	0.10	1.31	0.2
Rotlauibach	0.81	0.15	0.19	0.88	0.12	1.35	5.3
Ri Di Gallinoso	0.68	0.07	0.32	0.89	0.11	1.18	0.3
Ri Di Sozz	0.77	0.25	0.23	0.86	0.14	1.15	0.4
Blauseeligraben	0.71	0.24	0.29	0.88	0.12	1.06	0.4
Schwendibach	0.68	0.32	0.32	0.80	0.20	0.84	0.4
Saasbach	0.66	0.29	0.34	0.74	0.26	0.77	3.0
Glattbach	0.68	0.32	0.32	0.73	0.27	0.77	0.3
Heugandtal	0.62	0.28	0.38	0.74	0.26	0.70	0.4
ValMera1	0.64	0.33	0.36	0.70	0.30	0.65	0.4
Gerental 3B	0.64	0.35	0.36	0.69	0.31	0.62	1.7
Gonerli	0.61	0.46	0.39	0.79	0.21	0.55	0.5
Brichboden	0.59	0.41	0.41	0.75	0.25	0.52	0.3
Mittelwert	0.69	0.27	0.31	0.81	0.19	0.92	1.1
Standardabweichung	0.07	0.12	0.07	0.08	0.08	0.32	1.5

Tabelle 7. Prozentuelle Überdeckung nach Tabelle 5 für alle simulierten Ereignisse unter Verwendung k_B' (Bild 7). Der Bewertungsfaktor Ω liegt im Bereich [-2, 2].

Ereignis	α	β	γ	ε	ϕ	Ω	$\overline{h}_{pred}$ [m]
Rotlauibach	0.73	0.12	0.27	0.92	0.08	1.26	4.70
Ri Di Sozz	0.46	0.03	0.54	0.92	0.08	0.81	0.80
Brichboden	0.30	0.01	0.70	0.98	0.02	0.57	1.00
Richleren	0.28	0.00	0.72	0.99	0.01	0.55	0.80
Blauseeligraben	0.35	0.09	0.65	0.91	0.09	0.52	0.70
Schwendibach	0.25	0.08	0.75	0.84	0.16	0.26	1.10
Piz Caral	0.25	0.03	0.75	0.94	0.06	0.41	1.60
Glattbach	0.33	0.10	0.67	0.79	0.21	0.35	1.60
Heugandtal	0.33	0.18	0.67	0.76	0.24	0.24	1.20
Gerental 3B	0.50	0.33	0.50	0.64	0.36	0.31	1.60
Ri di Gallinoso	0.57	0.38	0.43	0.90	0.10	0.66	0.30
Saasbach	0.82	0.48	0.18	0.73	0.27	0.89	1.90
ValMera1	0.65	0.46	0.35	0.64	0.36	0.48	0.40
Gonerli	0.75	0.67	0.25	0.72	0.28	0.55	0.40
Mittelwert	0.47	0.21	0.53	0.83	0.17	0.56	1.29
Standardabweichung	0.21	0.21	0.20	0.12	0.12	0.28	1.10

Tabelle 8. Prozentuelle Überdeckung nach Tabelle 5 für alle simulierten Ereignisse (Bild 8) unter Verwendung k_{Bprog}. Der Bewertungsfaktor Ω liegt im Bereich [-2, 2].

3.4 Bestimmung der Auslauflänge nach Takahashi

Hungr et al. (1984) und Takahashi (1991) beschreiben ein einfaches eindimensionales, physikalisches Modell zur Bestimmung der Auslauflänge L_A von Murgängen (Takahashi & Yoshida, 1979). Basierend auf der Impuls- und Massenerhaltung berechnen sie für eine als konstant angenommene Abflussbreite die Auslauflänge L_A wie folgt:

$$L_A = \frac{V^2}{G}$$

mit

$$V = v\cos(\theta_G - \theta_K)\left[1 + \frac{gh\cos\theta_G}{2v^2}\right]$$

$$G = g(S_R\cos\theta_K - \sin\theta_K) \qquad (11a/11b/11c)$$

Gl. (11b) beschreibt die «treibende» Komponente des Murgange basierend auf der Fliessgeschwindigkeit v und Fliesshöhe h am Kegelhals sowie der Gerinne- θ_G bzw. Kegelneigung θ_K. Die «bremsende» Komponente (der Fliesswiderstand) wird mit Gl. (11c) beschrieben. Der wichtigste Parameter ist hier das dimensionslose Reibungsgefälle S_R (Rickenmann, 2005). Die Gleichungen liefern nur ein plausibles Resultat (d.h. eine positive Auslauflänge), wenn das Reibungsgefälle S_R grösser ist als die Kegelneigung θ_K:

$$S_R = \alpha\sin\theta_K \quad \text{mit } \alpha > 1 \qquad (12)$$

Sind die Auslauflänge L_A und die Parameter in Gl. (11b) und (11c) bekannt, kann durch Umformung von Gl. (11a) ein «beobachtetes» (passendes) Reibungsgefälle S_R' berechnet werden.

$$S_R' = \frac{V^2}{L_A g\cos\theta_K} + \tan\theta_K \qquad (13)$$

Nach Gl. (13) müssen zur Bestimmung von S_R', neben der beobachteten Auslauflänge L_A, auch die Fliessgeschwindigkeit v und die Fliesshöhe h am Kegelhals bekannt sein. Für die untersuchten Ereignisse sind keine diesbezüglichen Beobachtungen vorhanden, daher wurde ausgehend vom beobachteten Volumen der maximale Abfluss Q_{max} am Kegelhals sowie die Fliessgeschwindigkeit v nach Rickenmann (1999) abgeschätzt:

$$Q_{max} = 0.1\,V^{5/6}$$

$$v = 2.1\,Q_{max}^{1/3}\tan\theta_G^{1/3} \qquad (14/15)$$

Mittels Kontinuitätsgleichung und unter Annahme eines Rechteckgerinnes wurde die Fliesshöhe h wie folgt bestimmt:

$$h = \frac{Q_{\max}}{vb} \tag{16}$$

Die Gerinnebreiten b am Kegelhals wurden mittels der Luftbilder und der digitalen Geländemodelle gemessen. Die Murgangereignisse aus Österreich wurden hier nicht berücksichtigt, da für die vorhandenen Geländemodelle mit einer Auflösung von 10 m × 10 m keine vergleichbaren Gerinnebreiten (wie für die Schweizer und Südtiroler Ereignisse) gemessen werden konnten.

Der Zusammenhang zwischen dem «beobachteten» (aus den Beobachtungen rückgerechneten) Reibungsgefälle S_R' (Gl. 13) sowie dem Kegelgefälle (sin θ_K) ist in *Bild 10* dargestellt. Es ergibt sich ein relativ hoher Korrelationskoeffizient zwischen dem Reibungsgefälle und dem Kegelgefälle für die Murgänge in der Schweiz und Südtirol, welcher aber zum Teil auf dem Effekt einer scheinbaren Korrelation beruht, da S_R nicht kleiner sein kann als sin θ_K. Mit der linearen Regressionsgleichung lässt sich ein prognostiziertes Reibungsgefälle S_{Rprog} wie folgt berechnen:

$$S_{Rprog} = 1.29 \sin\theta_K \tag{17}$$

Ähnlich wie der beobachtete Mobilitätskoeffizient k_B', kann S_R', als Mass für die Mobilität der beobachteten Ereignisse gesehen werden. Der Zusammenhang zwischen (S_R'/sin θ_K) und k_B' für die Murgänge in der Schweiz und Südtirol ist in *Bild 11* dargestellt.

Aus der Regressionslinie in *Bild 11* lässt sich eine weitere empirische Gleichung für die Prognose des Reibungsgefälles $S_{Rprog[2]}$ in Abhängigkeit des beobachteten Mobilitätskoeffizienten und des Kegelgefälles ableiten:

$$S_{Rprog[2]} = 1.95 k_B'^{-0.13} \sin\theta_K \tag{18}$$

Da Gl. (18) auf den beobachteten Mobilitätskoeffizienten k_B' beruht, müssen ereignisbezogene Informationen (Volumen und Ablagerungsfläche) bekannt sein. Im Gegensatz dazu verwendet Gl. (17) nur eine morphometrische Grösse des Einzugsgebietes, nämlich die Neigung des Kegels. *Bild 12* zeigt einen Vergleich zwischen berechneten und beobachteten Auslauflängen, wobei die berechneten Auslauflängen sowohl mit S_{Rprog} (Gl. 17) als auch mit $S_{Rprog[2]}$ (Gl. 18) bestimmt wurden.

4. Diskussion

Die Simulationen der Reichweiten nach Corominas (1998) und Rickenmann (1999) zeigen eine recht gute Übereinstimmung mit den beobachteten Reichweiten der Daten dieser Studie. Da diese empirischen Modelle auf Pauschalgefälle-ähnlichen Ansätzen basieren, müssen der Startpunkt und das Längenprofil des Fliessweges bekannt sein. Die dafür notwendige, exakte Bestimmung des Anbruchgebietes ist für «murgangfähige» Einzugsgebiete nicht immer möglich. In der Praxis stösst das Modell an Grenzen, wenn sich Murgänge aufgrund einer «Verflüssigung» der Sohle oder aufgrund einer Kombination räumlich unterschiedlicher Rutschungsbereiche entwickeln. Vorsicht ist auch geboten bei teilweise konvexen Abschnitten im Längenprofil. Für Ereignisse mit eindeutigem Anbruchkriterium liefern beide Modelle akzeptable Ergebnisse für die Reichweite, hingegen kann die Unsicherheit bezüglich der Auslauflänge auf dem Kegel beträchtlich sein.

Wie bei der Methode zur Bestimmung der Reichweite aufgrund des Pauschalgefälles handelt es sich beim einfachen physikalischen Ansatz zur Bestimmung der Auslauflänge nach Takahashi & Yoshida (1979) um ein eindimensionales Modell. Bei der Anwendung dieses Modelles spielt das Reibungsgefälle S_R eine wesentliche Rolle und kann anhand bekannter Ereignisse rückgerechnet oder mit empirischen Gleichungen abgeschätzt werden. Das Reibungsgefälle S_R charakterisiert, ähnlich wie der Mobilitätskoeffizient k_B, den Fliesswiderstand während der Ablagerungsphase eines Ereignisses. Tendenziell führen granulare Murgänge mit grösseren Partikeln und möglicherweise kleineren Wassergehalten zu steileren Wildbachkegeln, was ein möglicher Grund für die Korrelation von S_R mit dem Kegelgefälle ist (Rickenmann, 2005). Für 14 Murgänge im Kamikamihori-Tal in Japan mit Messungen zu h und v ergab die Rückrechnung $S_R = 1.12 \tan\theta_K$ (Rickenmann, 2005). Möglicherweise hängen die vergleichsweise grösseren Reibungsgefälle S_R für die Daten in *Bild 10* damit zusammen, dass die Fliessparameter aufgrund der ganzen Murenfracht abgeschätzt werden mussten (Gl. 14–16) und tendenziell grösser sind als für einzelne Murgangschübe. Die inverse Korrelation zwischen den «beobachteten» Reibungsgefällen und den «beobachteten» Mobilitätskoeffizienten ist plausibel im Hinblick auf die physikalische Interpretation der beiden Parameter. Die entsprechende empirische Beziehung setzt Informationen über Ereignisvolumen und Ablagerungsfläche voraus. Für Ereignisse mit kanalisierter Ablagerung entlang eines Gerinnes, wo z.B. ein tiefes Gerinne am Kegel ein seitliches Ausbrechen der Murgangmassen verhindert, ist der Ansatz für die Abschätzung der Auslauflänge nach

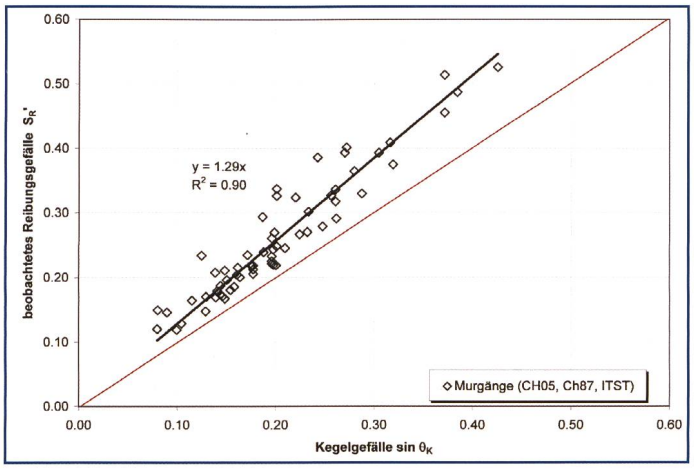

Bild 10. Zusammenhang zwischen dem beobachteten Reibungsgefälle (S_R') und dem Kegelgefälle (sin θ_K).

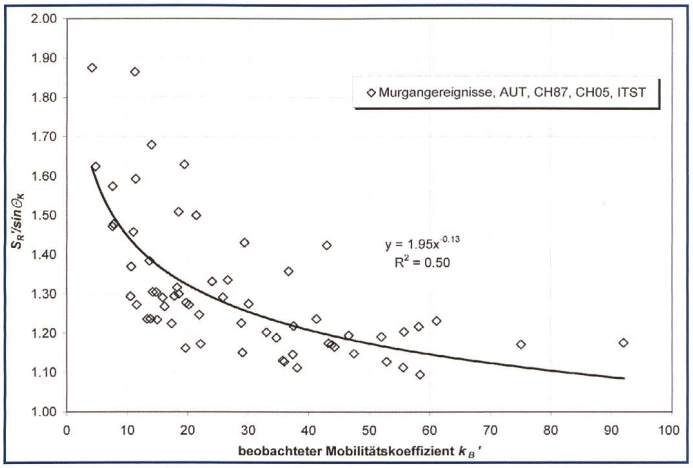

Bild 11. Zusammenhang zwischen dem Verhältnis beobachtetes Reibungsgefälle zu Kegelgefälle (S_R'/sin θ_K) und dem beobachteten Mobilitätskoeffizienten k_B'.

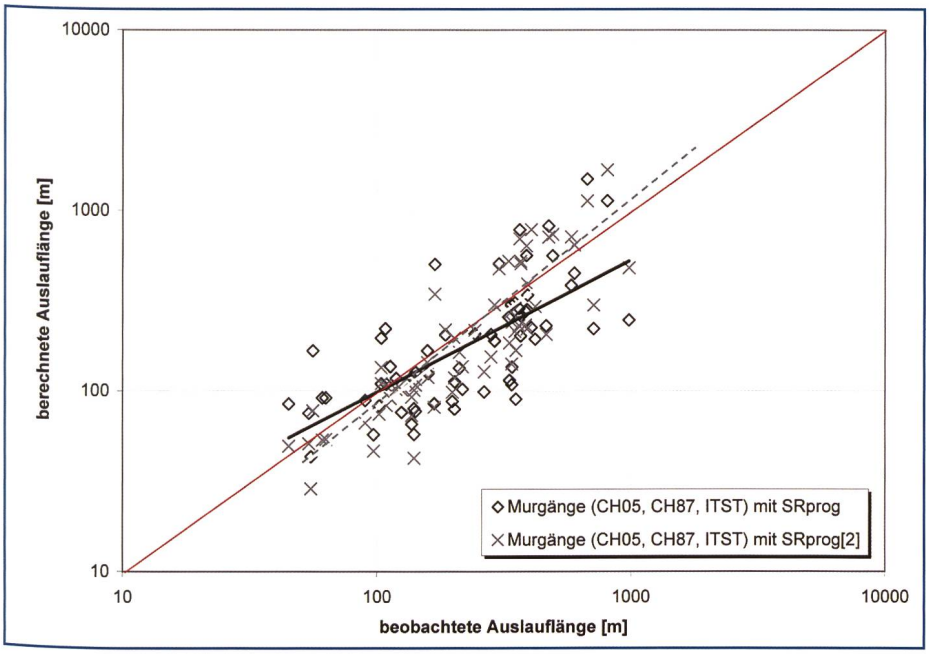

Bild 12. Vergleich der berechneten Auslauflängen (Gl. 11a-c) bei Anwendung von S_{Rprog} Gl. (17) (schwarze Trendlinie für eine Regression mit Potenzfunktion) bzw. $S_{Rprog[2]}$ nach Gl. (18) (strichlierte hellgraue Trendlinie für eine Regression mit Potenzfunktion) mit den beobachteten Auslauflängen. Die rote Linie entspricht der 1:1-Beziehung zwischen berechneter und beobachteter Auslauflänge.

Takahashi grundsätzlich geeignet. Beim zweidimensionalen Modell TopRunDF wird die Lage der Ablagerungsfläche hauptsächlich von der Topographie des Murkegels gesteuert. Dabei kann die Wahl des Startpunktes einen bedeutenden Einfluss auf die Simulation des Ablagerungsverhaltens haben. Für die Nachrechnung von Ereignissen ist es deshalb wichtig, Geländemodelle zu verwenden, die eine Abbildung der topographischen Situation vorher zeigen. Die seitliche Ausbreitung der Simulation wird über die so genannte Monte-Carlo-Iterationszahl (MCI-Zahl), die Anzahl der zufallsbasierten Fliesspfade, gesteuert. Die MCI-Zahl beeinflusst direkt die Grösse des Ausbreitungswinkels der simulierten Ablagerung, unabhängig von der Kegeltopographie, und kann daher als ein Parameter zur Kontrolle der seitlichen Ausbreitung betrachtet werden. Die Simulationsergebnisse reagieren unterschiedlich sensibel auf die gewählte MCI-Zahl. Wird die MCI-Zahl relativ klein gewählt (z.B. MCI = 5), ist eine Abnahme der positiven Überdeckung (α) und eine Zunahme der negativen (β) bzw. keiner Überdeckung (γ) festzustellen *(Tabelle 6)*. Ist die gewählte MCI-Zahl sehr gross (z.B. MCI = 500), wird die negative Überdeckung (β) verringert, die prozentuelle Fläche ohne Überdeckung (γ) wird jedoch grösser als die Flächen positiver Überdeckung (α). Die Kalibrierung mit 14 simulierten Schweizer Murgangereignissen ergab eine optimierte MCI-Zahl von 50. Die endgültige Abgrenzung der Ablagerungsfläche erfolgt über eine Flächen-Volumen-Beziehung. Der Vorteil von TopRunDF liegt in der Benutzung von geomorphometrisch leicht zu erhebenden Eingangsparametern. Ein weiterer Forschungsbedarf besteht bezüglich der Verbesserung des Ausbreitungsmechanismus (MCI-Zahl) sowie einer detaillierteren künstlichen Geländeerhöhung.

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In diesem Beitrag sind Modelle zur Abschätzung der Reichweite oder des Ablagerungsverhaltens von Murgängen beschrieben, welche vorwiegend auf empirisch-statistischen Ansätzen beruhen. Bei den eindimensionalen Ansätzen handelt es sich einerseits um die Reichweitenmodelle von Corominas (1996) und Rickenmann (1999) und andererseits um das konstante Abflussmodell zur Bestimmung der Auslauflänge nach Takahashi & Yoshida (1979). Zur Simulation von Ablagerungsflächen wird das zweidimensionale Modell TopRunDF vorgestellt. Grundlage für dieses Modell sind die Topographie des Kegels, die aufgrund der Murenfracht und morphometrischer Parameter abgeschätzte Grösse der Ablagerungsfläche sowie eine zufallsbasierte Verteilung der potenziellen Fliesspfade. Alle hier diskutierten Modelle erfordern einfach bestimmbare geomorphometrische Eingangsgrössen. Die Modelle wurden auf Murgangereignisse in der Schweiz, in Österreich und in Südtirol angewendet. Im Hinblick auf die für Murgänge bzw. Übermurungen empfohlenen Kriterien für die Kartierung der Gefahrenbereiche kann mit den hier vorgestellten Modellen die maximale lineare oder flächige Ausbreitung bestimmt werden. Intensitäten wie Fliessgeschwindigkeit und Ablagerungshöhe sind mit den vorgestellten Modellen nicht oder nur bedingt darstellbar. Unsere Daten bestätigen eine empirische Beziehung zwischen der Ablagerungsfläche und dem Ereignisvolumen. Der daraus abgeleitete Mobilitätskoeffizient reflektiert die unterschiedliche Mobilität und Fliesseigenschaften während der Ablagerungsphase von Murgängen. Der prognostizierte Mobilitätskoeffizient, basierend auf der Kegel- und Gerinneneigung, ist mit einer Ungenauigkeit von etwa einem Faktor 2 verbunden. Die mit TopRunDF simulierten Schweizer Ereignisse zeigen plausible Ergebnisse. Mit dem Modell TopRunDF wird eine räumliche Verteilung der Ablagerungshöhen simuliert. Diese Verteilung beruht auf den nach einem Zufallsprinzip und der Topographie bestimmten Überflutungswahrscheinlichkeiten und sollte mit detaillierten Feldstudien beobachteter Ablagerungshöhen überprüft werden.

Das Simulationsmodell TopRunDF könnte zum Beispiel zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten, d.h. zur Bestimmung von Flächen mit möglichen Murgangablagerungen auf Wildbachkegeln, verwendet werden, wobei der Mobilitätskoeffizient nach Gl. (8) mit einem Faktor 2 multipliziert werden könnte. Im Weiteren können die mit TopRunDF bestimmten potenziellen Murgangablagerungsflächen mit Resultaten von numerischen Simulationsprogrammen wie z.B. FLO-2D oder RAMMS verglichen werden. Da bezüglich der Wahl geeigneter Fliess- oder Material-Parameter bei solchen prozessorientierten, physikalisch basierten Modellen eine gewisse Unsicherheit besteht (Rickenmann et al., 2006), ergäbe ein Vergleich verschiedener Ansätze einen Hinweis auf die Zuverlässigkeit bzw. Unsicherheit der Simulationsresultate.

6. Verdankung

Die Daten zu den Murgangereignissen in Südtirol wurden von der Abteilung 30 – Wasserschutzbauten der Autonomen Provinz Bozen zur Verfügung gestellt. Mathias Hochschwarzer sei für die Aufbereitung dieser Daten und die Reichweitenanalyse gedankt. Für die Bereitstellung und Zusammenstellung von Daten zu österreichischen Wildbacherereignissen bedanken wir uns

beim Forsttechnischen Dienst der Wildbach- und Lawinenverbauung sowie bei Christian Schraml. Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) unterstützte die Analyse der Hochwasser 2005 in der Schweiz. Das LiDAR DTM verschiedener Murkegel in der Schweiz (verwendet für die Simulationen mit TopRunDF) wurde vom Bundesamt für Landestopographie (swisstopo) zur Verfügung gestellt (DTM-AV DOM-AV ©2008 swisstopo, DV033492.2). Markus Zimmermann erstellte die Kartierungen der Schweizer Murgangereignisse 1987. Marcel Hürlimann stellte seine Version des zufallsbasierten «Fliessweg-Algorithmus» zur Verfügung, welcher die Grundlage des Simulationsmodells TopRunDF bildet.

Literatur

Bardou, E. (2002): Methodologie de diagnostic et prévision des laves torentielles sur un basin versant alpin. Thèse no. 2479, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

BWW/BRP/BUWAL (1997): Empfehlungen: Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Herausgeber: Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Bundesamt für Raumplanung (BRP), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), EDMZ Nr. 804.201d, Bern, 32p.

Berti, M., Simoni A. (2007): Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships. Geomorphology 90, 144–161.

Bezzola, G.R., Hegg C. (Ed.) (2007): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707, 215 S.

Capra, L., Macias, J.L., Scott, K.M., Abrams, M., Gardunomonroy, V.H. (2002): Debris avalanches and debris flows transformed from collapses in the Trans-Mexican Volcanic Belt. Journal of Volcanology and Geothermal Research 113, 81–110.

Carranza, E.J.M., Castro, O.T. (2006): Predicting lahar-inundation zones: Case study in West 32 Mount Pinatubo, Philippines. Natural Hazards 37, 331–372.

Corominas, J. (1996): The angle of reach as mobility index for small and large landslides. Canadian Geotechnical Journal 33, 260–271.

Costa, J.E. (1988): Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows. In: Baker VR, Kochel R.C., Patton P.C. (eds) Flood geomorphology, Wiley, New York, pp. 113–122.

Crosta, G.B., Cucchiaro, S., Frattini, P. (2003): Validation of semi empirical relationships for the definition of debris-flow behaviour in granular materials. Proc. 3rd International Conference on Debris Flows Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment. Millpress, Rotterdam, 2003, pp. 821–831.

Griswold, J.P. (2004): Mobility statistics and hazard mapping for non volcanic debris flows and rock avalanches. Masters thesis, Portland State University, USA.

Heim, A. (1932): Bergsturz und Menschenleben. Zürich: Fretz & Wasmuth Verlag AG.

Hochschwarzer, M. (2009): Vergleich von Simulationsmodellen zur Reichweitenabschätzung alpiner Murgänge am Beispiel Südtiroler Ereignisse. Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien.

Hübl J., Kienholz H., Loipersberger A. (2002): DOMODIS – Documentation of Mountain Disasters, State of Discussion in the European Mountain Areas. International Research Society Interpraevent, Klagenfurt, Austria (http://wasser.ktn.gv.at/interpraevent).

Hürlimann, M., Rickenmann, D., Medina, V. & Bateman, A. (2008): Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment. Engineering Geology 102, 152–163.

Hungr, O., Morgan, G., Kellerhals, R. (1984): Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. Canadian Geotechnical Journal 21, 663–677.

Iverson, R.M., Schilling, S.P., Vallance, J.W. (1998): Objective delineation of lahar inundation hazard zones. GSA Bulletin 110, 972–984.

Marchi, L., D'Agostino, V. (2004): Estimation of debris-flow magnitude in the eastern Italian alps. Earth Surface Processes and Landforms 29, 207–220.

Melton, M.A. (1965): The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits on southern Arizona. Journal of Geology 73, 1–38.

Takahashi, T., Yoshida, H. (1979): Study on the deposition of debris flows, Part 1 – Deposition due to abrupt change of bed slope. Annuals, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan, 22 B-2.

Takahashi, T. (1991): Debris flows. IAHR Monograph Series. Rotterdam: Balkena.

Rickenmann, D. (1999): Empirical Relationships for Debris Flows, Natural Hazards 19, 47–77.

Rickenmann, D. (2005): Runout prediction methods. In: Jakob, M., Hungr, O. (eds.), Debris Flow Hazards and Related Phenomena, Springer, Chichester, pp. 305–324.

Rickenmann, D., Laigle, D., McArdell, B.W., Hübl. J. (2006): Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. Computational Geosciences 10, 241–264.

Rickenmann, D., Koschni, A., Chiari, M., Scheidl, C., Canuto, N. (2008): Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen und Gebirgsflüssen. In: Bezzola G.R., Hegg C. (eds), Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Umwelt-Wissen Nr. 2508; 152–162.

Scheidl, C., Rickenmann, D. & Chiari, M. (2008): The use of airborne LiDAR data for the analysis of debris flow events in Switzerland. Natural Hazards and Earth System Sciences 8, 1113–1127.

Scheidl, C., Rickenmann, D. (2009): Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans. Earth Surface Processes and Landforms (in press).

Schraml, C. (2007): Ablagerung von Feststoffen auf Wildbachkegeln. Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien.

ONR-24800 (2009):ON-Komitee 256 – Schutz vor Naturgefahren. Wien.

VAW (1992): Murgänge 1987, Dokumentation und Analyse. Bericht Nr.: 97.6 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich. (unveröffentlicht).

Waythomas, C.F., Miller, T.P., Beget, J.E. (2000): Record of Late Holocene debris avalanches and lahars at Iliamna Volcano, Alaska. Journal of Volcanology and Geothermal Research 104, 97–130.

Yu, F., Chen, C., Chen, T., Hung, F., Lin, S. (2006): A GIS Process for delimitating areas potentially endangered by debris flows. Natural Hazards 37, 169–189.

Zimmermann, M., Mani, P., Gamma, P., Gsteiger, P., Heiniger, O., Hunziker G. (1997): Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS basierter Ansatz. Schlussbericht NFP31, vdf-ETH Zürich.

Anschrift der Verfasser:
Dr. *Dieter Rickenmann*
Eidgenössische Forschungsanstalt WSL,
Gebirgshydrologie und Wildbäche,
Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf
Tel. +41 44 739 24 29
rickenmann@wsl.ch, www.wsl.ch

Dr. *Christian Scheidl,* Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur
Peter Jordan-Strasse 82, A-1190 Wien
Tel: +43 1 47654 4378
christian.scheidl@boku.ac.at
http://www.boku.ac.at/ian